

ИЗУЧЕНИЕ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЛИТОСФЕРЕ ТЯНЬ-ШАНЯ ПО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИМ ДАННЫМ (МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ)

© 2019 В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков, А.К. Рыбин

Научная станция РАН в г. Бишкеке (НС РАН), 720049, г. Бишкек, Киргизская Республика;
e-mail: bataleva@gdirc.ru

На основе полевых глубинных магнитотеллурических измерений, выполненных в Тянь-Шанском регионе рассмотрены примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения. В основу проведенных исследований положена следующая рабочая гипотеза: при необратимых деформациях горной породы (трещинообразовании) в результате развития современных геодинамических процессов формируются источники электромагнитного поля эндогенного происхождения. Предложен подход, согласно которому электромагнитное поле эндогенного происхождения входит в импедансные соотношения аддитивным образом, что позволяет разделить электромагнитное поле, зарегистрированное на дневной поверхности, по положению источников. Суть алгоритма состоит в том, что по известному импедансу нижнего полупространства нужно найти разность зарегистрированных на дневной поверхности тангенциальных компонент электромагнитного поля. Для реализации алгоритма составлена программа обработки данных магнитотеллурического зондирования с целью выделения источников электромагнитного поля эндогенного происхождения.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, лунно-солнечные приливы, энергетическая характеристика, Тянь-Шань.

ВВЕДЕНИЕ

Под современными геодинамическими процессами мы понимаем широкий спектр явлений природы, связанных с обратимыми и необратимыми процессами (от землетрясений до оползнеобразований и техногенных воздействий), происходящих в настоящее время. Эти процессы принято подразделять на две группы — экзогенные и эндогенные. К экзогенным относятся те геодинамические процессы, которые происходят на поверхности Земли или в приповерхностных условиях при нормальных давлениях и температурах (оползни, процессы механического разрушения горных пород и т.д.) и обусловлены влиянием различных атмосферных агентов, гравитацией и др. Эндогенные геодинамические процессы вызваны действием сил тяжести, возникающих при вращении Земли, процессами магматизма, метаморфизма и деформации.

Наиболее мощным природным процессом являются лунно-солнечные приливы, приво-

дящие к трещинообразованию в литосфере. В процессе трещинообразования формируются трещины, которые являются источником как сейсмического, так и электромагнитного поля. Последнее представляет интерес для изучения современных геодинамических процессов в режиме пассивного электромагнитного мониторинга. Одним из таких методов является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Основная проблема в постановке этой задачи это разделение поля по положению источников, которая решена в работах (Александров, 2009, 2014; Александров, Рыбин, 2017; Баталев и др., 2017; Alexandrov, 1997).

Рабочая гипотеза акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитного излучения (ЭМИ) основана на представлении о пространственной и временной дискретности их источников (Баталев и др., 2017, 2018). Основные положения этой гипотезы сводятся к следующему (Александров, 2009, с. 49-51):

«1. Поля АЭ и ЭМИ являются суперпозицией полей элементарных источников. Последова-

тельное появление в пространстве и во времени источников (источники появляются с временной задержкой в разных точках пространства и с разной амплитудой), непосредственно связано с появлением движущихся источников, скорость перемещения которых (имеется в виду эффективная) может весьма существенно влиять на формирование полей АЭ и ЭМИ.

2. Элементарный источник АЭ и ЭМИ связан с образующейся при разрушении трещиной. Каждая отдельная трещина создает наиболее мощный источник, как акустического, так и электромагнитного поля (Гершензон, Гохберг, 1994; Механика ..., 1987; Шамина, Понятовская, 1993).

3. Элементарные источники АЭ и ЭМИ — источники импульсного типа, в которых содержится широкий спектр частот (Разрушение ..., 1979).

4. Элементарные источники АЭ и ЭМИ связаны местоположением и ориентацией в пространстве (Earthquake ..., 2001).

5. Электромагнитные параметры среды за время одного сеанса наблюдения АЭ и ЭМИ не меняются.

6. Взаимодействие поля ЭМИ со сплошной средой подчиняется уравнениям Максвелла, АЭ — уравнениям теории упругости. Физические свойства горных пород и малые амплитуды акустического и электромагнитного полей, распространяющихся в геологической среде, приводят к необходимости рассматривать ее как линейную диссипативную систему (Кондратьев, 1986; Светов, 1984)».

Под необратимыми деформациями в земной коре авторы статьи понимают неупругие (разрывные) деформации, когда после снятия напряжения не происходит схлопывания трещин. Рабочая гипотеза о генерации электромагнитного поля эндогенного происхождения сводится к следующему: при необратимых деформациях горной породы (трещинообразовании) в результате развития современных геодинамических процессов формируются источники электромагнитного поля эндогенного происхождения.

Ярким примером сейсмоактивного региона является Тянь-Шань, где на территории Бишкекского геодинамического полигона наблюдаются и исследуются вариации электропроводности горных пород (как в натуральных, так и лабораторных условиях), вариации геомагнитного поля, температурные аномалии атмосферы Земли, изменения современных движений земной коры и т.д. Ввиду того, что электромагнитный мониторинг выполняется различными электроразведочными методами — методом зондирования становлением поля в дальней зоне с использованием в качестве искусственного источника

возбуждения поля электроимпульсной системы ЭРГУ-600-2 и методом магнитотеллурического зондирования, где в качестве источника используется естественное электромагнитное поле (Бердичевский, Дмитриев, 2009) — исследованию вариаций электропроводности горных пород, возникающих в геологической среде при геодинамических процессах естественного и техногенного происхождения уделяется особое внимание. В настоящее время известны различные механизмы возбуждения электромагнитных сигналов, возникающие в результате сейсмических и деформационных процессов в геологической среде. Причины возникновения аномальных вариаций электропроводности достаточно подробно рассмотрены в работе (Гершензон, Гохберг, 1994). Авторы цитируемой статьи обращают особое внимание на основной фактор генерации поля — механо-электрические процессы в земной коре, в основе которых лежат: электрокинетический (изменение сопротивления среды при изменении ее напряженно-деформированного состояния за счет динамики флюидов); пьезоэлектрический (возникновение локального электрического поля в окружающем пространстве); пьезомагнитный (появление намагниченности в горных породах под воздействием внешнего давления) и другие эффекты. Сопоставление вклада различных механо-электромагнитных процессов показало, что для верхней части разреза электрокинетический эффект является доминирующим.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа использовались геофизические наблюдения — полевые данные режимного и стационарного магнитотеллурического (МТ) мониторинга, обработанные по методике азимутального МТ-мониторинга (Баталева, Баталев, 2014а, 2014б; Баталева и др., 2013), и данные цифровых сетей KNET и KRNET (<http://www.gdirc.ru/lki/napravlenija-issledovanij/sejsmologicheskie-nabljudenija>; <https://seismo.kg/gu>). Система МТ-мониторинга Бишкекского геодинамического полигона (БПП) включает в себя (Баталева, Мухамадеева, 2018):

– стационарные пункты наблюдений (рис.1) Ак-Суу и Чон-Курчак, где осуществляется непрерывная регистрация МТ-поля на встроенную флеш-память измерительной аппаратуры, продолжительность записи зависит от объема флеш-памяти и параметров регистрации, при максимальной частоте опроса продолжительность записи составляет порядка 20 суток, после чего производится копирование данных с флеш-памяти на ноутбук, техническое обслуживание аппаратуры и её перезапуск;

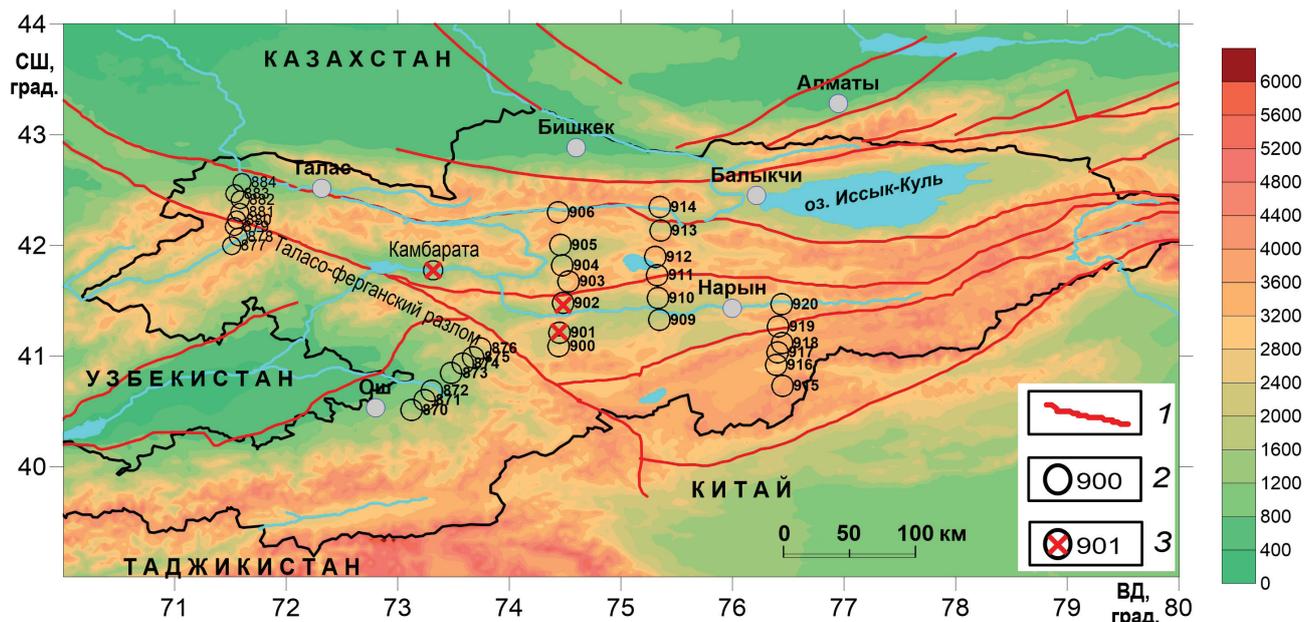


Рис. 1. Карта Центрального Тянь-Шаня с расположением пунктов ГМТЗ Научной станции РАН в г. Бишкеке: 1 — разломные структуры; 2 — пункты зондирования ГМТЗ; 3 — пункты зондирования ГМТЗ, для которых рассмотрена взаимосвязь анизотропии электрического сопротивления, энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения и сейсмическими событиями.

Fig. 1. Map of the Central Tien Shan with the location of the points of the DMT Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek: 1 — fault structures; 2 — DMT sounding points; 3 — DMT sounding points for which the interrelation of the electrical resistivity anisotropy, the energy characteristic of the electromagnetic field of endogenous origin and seismic events is considered.

– сеть профильных наблюдений мини-полигона Кентор, где режим измерений зависит от задач исследования и носит сезонный характер — две сессии (весна и осень);

– режимные пункты МТ-мониторинга (рис.1), где измерения могут выполняться в различных модификациях МТЗ — МТЗ или глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ). Эти пункты расположены в наиболее тензочувствительных зонах, в режимных пунктах наблюдения и на профилях временной интервал регистрации МТ-поля составляет от нескольких часов до нескольких суток, что определяет глубинность зондирований.

В работе использовались данные мониторинговой сети пунктов ГМТЗ, которая была заложена в различных геоэлектрических условиях на большой территории (рис. 1), что увеличило вероятность обнаружения индикаторных точек. В рамках этой работы были проанализированы МТ-данные 34 пунктов ГМТЗ на пяти профилях (рис. 1) для оценки взаимосвязи вариаций кажущегося сопротивления с приливными воздействиями и сейсмическими событиями (Баталева и др., 2014). Записи на пунктах наблюдения производились около 72 часов с тем, чтобы была возможность обработать все данные по методике азимутального мониторинга (Баталева, Баталев, 2014а, 2014б; Баталева, Баталев, 2015; Баталева и др., 2013, 2014). В 2018 г. база

данных МТ-мониторинга (Рыбин и др., 2012) была дополнена новой серией измерений по сети ГМТЗ профилей.

В качестве исходного материала для анализа поведения сейсмичности на территории БГП использовался региональный сейсмический каталог, составленный в Научной станции РАН по данным цифровой сети KNET, работающей в режиме реального времени, и каталог Института сейсмологии Национальной академии наук Киргизской Республики, включающий данные сети KRNET (Каталог ..., 2014). Для исследования выбрана территория в пределах 41.5–43.5° с.ш., 73–77° в.д. (территория БГП), где чувствительность сети KNET достаточна для регистрации событий энергетических классов по Раутиан $K \geq 7$ (магнитуды не менее 1.7) практически без пропусков. Система сейсмологических наблюдений сети KNET состоит из 10 цифровых широкополосных автоматических телеметрических станций, двух радиоретрансляторов и трех центров сбора и обработки сейсмологической информации. Для измерений применяются датчики Streckeisen STS-2 с регистраторами REF ТЕК72-6, которые обеспечивают регистрацию сейсмического сигнала в большом динамическом диапазоне (140 дБ) и широкой полосе частот (0.008 – 50 Гц).

В настоящий момент сеть KRNET, функционирующая с 2009 г., состоит из 15 цифровых

широкополосных сейсмических станций, охватывающих всю территорию Киргизской Республики, что позволяет определять основные параметры землетрясений не только на территории Киргизской республики, но и на сопредельных территориях. Для определения значений основных параметров землетрясений в Институте НАН КР используют программу Hypoellipse (Lahr, 1999).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод магнитотеллурического зондирования представляет собой разновидность индукционного частотного зондирования. В отличие от других методов индукционного зондирования (частотного зондирования (ЧЗ) и зондирования становления поля (ЗС)), МТЗ не требует использования генераторных установок, поскольку метод основан на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли — магнитотеллурического поля (МТ-поля). Естественное электромагнитное поле содержит колебания различного типа — атмосферерики, пульсации, бухты, мировые магнитные бури. Глубина проникновения поля зависит от периода вариаций. За счет явления скин-эффекта высокочастотные колебания магнитотеллурического поля быстрее затухают с глубиной, а низкочастотные проникают на большие глубины. В связи с чем, высокочастотные компоненты поля несут информацию о верхней части геоэлектрического разреза, а по длиннопериодным вариациям мы получаем информацию о глубинной части разреза (Жданов, 1986; Хмелевской, 1984).

Существует еще одно значимое отличие метода МТЗ от других электроразведочных методов — необходимость перехода от отдельных компонент электромагнитного поля к передаточным функциям, которые представляют собой отношения тех или иных компонент МТ-поля, измеренных в пункте зондирования, что позволяет исключить неизвестные параметры источников естественного электромагнитного поля. Зависимость этих величин от периода принято изображать в виде амплитудных и фазовых кривых МТЗ, являющихся частотными характеристиками исследуемого разреза. Сопrotивление среды определяется импедансом — отношением горизонтальных составляющих электромагнитного поля для различных периодов колебаний поля.

В каждом пункте зондирования производится регистрация двух электрических (E_x , E_y) и трех магнитных компонент (H_x , H_y , H_z) электромагнитного поля. Компоненты электрического поля измеряются с помощью пятиэлектродной крестообразной установки, состоящей из элект-

рических диполей длиной 50 м. Центральный электрод используется для подавления электрических синфазных помех, наводимых на входных цепях измерительной аппаратуры силовыми промышленными установками, радиотехническими средствами и др. В качестве заземлений используются специальные неполяризующиеся электроды, разработанные в Научной станции РАН (А. с. №123979 U1). Датчики электрического и магнитного полей ориентируются по магнитному меридиану и перпендикулярно ему (азимуты 0° и 90° , соответственно).

В настоящее время для метода МТЗ существует хорошо разработанный аппарат анализа и интерпретации данных.

Магнитотеллурические зондирования выполняются с использованием аппаратуры MTU фирмы «Phoenix Geophysics» (Канада): пятиканальных измерительных станций MTU-5 и MTU-5A, позволяющих регистрировать электрические (E_x , E_y) и магнитные (H_x , H_y , H_z) компоненты магнитотеллурического поля.

Магнитотеллурический метод для изучения современных геодинамических процессов используется Научной станцией РАН в г. Бишкеке свыше 30 лет. В течение этого периода получены важные результаты, однако развитие теории магнитотеллурического метода позволяет расширить изучение современных геодинамических процессов. Теоретической основой этих новых возможностей являются результаты, полученные в работах (Баталев и др., 2017; Матюков и др., 2018). На основе полученного аналитического решения прямой задачи МТЗ с использованием продолжения поля, в работах предложен подход, согласно которому электромагнитное поле эндогенного происхождения входит в импедансные соотношения аддитивным образом. Такая линейная связь позволяет разделить электромагнитное поле, зарегистрированное на дневной поверхности, по положению источников. Суть алгоритма состоит в том, что по известному импедансу нижнего полупространства нужно найти разность зарегистрированных на дневной поверхности тангенциальных компонент электромагнитного поля. Для реализации алгоритма разработана программа обработки данных МТЗ с целью выделения источников электромагнитного поля эндогенного происхождения.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНДОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для построения системы обработки данных МТЗ с целью изучения геодинамической активности геологической среды необходимо знать импеданс нижнего полупространства Z ,

который можно найти в период геодинамического затишья на основе соотношения (Александров и др., 2018):

$$\mathbf{E}_0 = Z\mathbf{H}_0 + \mathbf{Y},$$

где \mathbf{E}_0 и \mathbf{H}_0 тангенциальные компоненты электрического и магнитного полей на поверхности слоистого разреза; Z — импеданс нижнего полупространства; \mathbf{Y} — электромагнитное поле источников, находящихся в нижнем полупространстве, Z_0 — импеданс на поверхности слоистого разреза.

Поскольку с течением времени меняется не только \mathbf{Y} , но и Z_0 , то

$$\mathbf{E}_0 = (Z_0 + \Delta Z(t))\mathbf{H}_0 + \mathbf{Y} = Z_0\mathbf{H}_0 + (\Delta Z(t)\mathbf{H}_0 + \mathbf{Y}),$$

при этом изменение $\Delta Z(t)\mathbf{H}_0$ связано с ионосферными токами низкой частоты, а \mathbf{Y} — с более высокочастотными.

Обратной задачей пассивного электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов является определение по известному импедансу нижнего полупространства Z электромагнитного поля источников в нижнем полупространстве:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{E}_0 - Z\mathbf{H}_0.$$

Последнее уравнение справедливо при любых источниках, находящихся в нижнем полупространстве (не обязательно слоистом) и его параметрах. Далее ставится задача определения по вычисленному на дневной поверхности значению \mathbf{Y} местоположения области разрушения горной породы и количественной оценки интенсивности процессов.

По результатам исследований, выполненных на территории Бишкекского геодинамического полигона в 1990-х годах и изложенных в статье (Светов и др., 1997), было установлено, что поля эндогенного происхождения составляют десятки процентов от магнитотеллурического поля, что в полной мере согласуется с полученными авторами оценками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдаемые в полевых геофизических исследованиях сигналы такие как акустической эмиссии и электромагнитного излучения эндогенного происхождения представляют собой установленные физические явления (Соболев, 1993). Однако использование этих явлений в геофизической практике сдерживается отсутствием формальной теории. К настоящему времени попытки ее построения базируются на некоторых обобщениях (Светов, 1986; Сейсмический ..., 1986; Шамина, Понятовская, 1993 и др.) хорошо изученных контролируемых источников, что приближает нас не только к объяснению пове-

дения наблюдаемых сигналов, но и позволяет объяснить в их рамках установленные эффекты.

Основной целью настоящей работы является сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов. Рассмотрим примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения с использованием как ретроспективных данных ГМТЗ (длительность записи 70–72 часа), так и выполненных на режимных пунктах ГМТЗ (рис. 1) в 2018 г., полученных в Тяньшанском регионе сотрудниками Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Для всех пунктов ГМТЗ (рис. 1) была рассчитана оценка корреляции вариаций модуля кажущегося сопротивления и фаз импеданса с лунно-солнечными приливными воздействиями. Результаты, полученные с помощью специально разработанных программ анализа данных азимутального МТ-мониторинга (Баталева, Баталев, 2014а, 2014б) при определении корреляции с компонентами лунно-солнечных приливов, свидетельствуют о том, что хотя коэффициенты корреляции и могут достигать значений >0.8 , однако, в среднем они расположены в интервале от 0.3 до 0.5 (Баталева и др., 2014). Учитывая, что значение коэффициента корреляции соответствует значению кросскорреляционной функции при нулевой отметке, а максимумы функции проявляются со сдвигом, в настоящей работе при сопоставлении энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения с лунно-солнечными приливными воздействиями рассматривается поведение кросскорреляционной функции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки записей ГМТЗ для пунктов 910, 914, 920 (рис. 1) выделены компоненты электромагнитного поля эндогенного происхождения и рассчитаны их энергетические характеристики (рис. 2). Под *энергетической характеристикой* электромагнитного поля эндогенного происхождения будем понимать интеграл

$$\int_0^{\Delta W} |\mathbf{Y}(\omega)| d\omega$$

по частоте от величины, полученной после преобразования Фурье зарегистрированных сигналов во временной области в течение одного часа.

В полученных результатах обработки проявляется периодическая составляющая в поведении кривых энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения с периодом 12 часов. Аналогичное

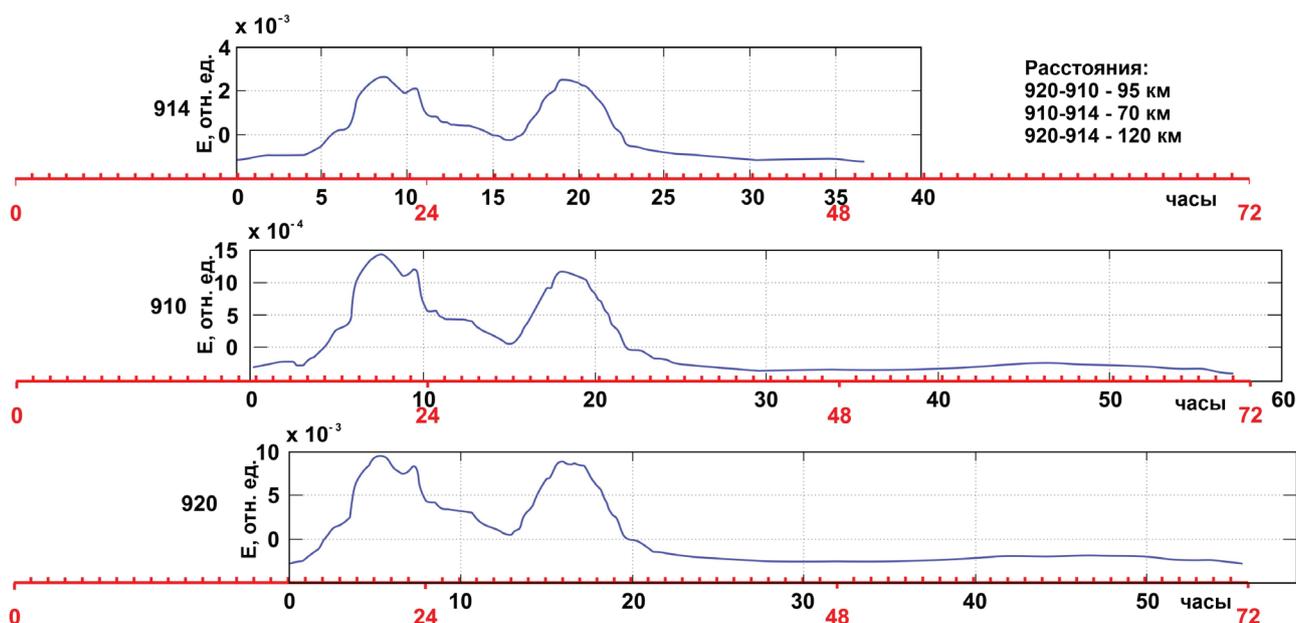


Рис. 2. Энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения для пунктов ГМТЗ 914, 910, 920.

Fig. 2. Energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin for the DMT points 914, 910, 920.

поведение характеристик выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения отмечается для стационарного пункта МТ-мониторинга Ак-Суу (рис. 3) и для ряда пунктов ГМТЗ 902 и 905 (рис. 4). Такое поведение энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения потребовало их сопоставления с лунно-солнечными приливами.

С этой целью подробнее рассмотрим результаты обработки полевых записей пунктов ГМТЗ 901 и 902, где по первому часу записи электромагнитного поля определялся магнитотеллурический импеданс геологической среды, который использовался для обработки данных ГМТЗ по каждому последующему часу. Затем вычислялся модуль вектора горизонтальных компонент электрического поля эндогенного происхождения $|Y|$ с последующим осреднением по 5 точкам по часовым наблюдениям и по 100 точкам по частоте. В результате обработки 3-х суточной полевой записи ГМТЗ для пункта 901 выделено электромагнитное поле эндогенного происхождения и получено распределение энергии этого поля в пределах трех суток для всех частот зондирования (рис. 5). Далее было проведено сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов (рис. 6). Анализ графика функции взаимной корреляции (рис. 6б) свидетельствует о том, что причиной изменения энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного

происхождения являются лунно-солнечные приливы. Таким образом, можно говорить о присутствии причинно-следственной связи между лунно-солнечными приливами и энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения.

Полученные результаты позволяют сформулировать задачу об определении причинно-следственной связи между лунно-солнечными приливами и энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения. При этом присутствует временная задержка между лунно-солнечными приливами и изменением энергии электромагнитного поля эндогенного происхождения. Так, для пункта ГМТЗ 901 (частоты больше 0.2 Гц) это время задержки составляет 2.2 часа (рис. 7). Другими словами, сначала меняются лунно-солнечные приливы, а затем, через 2.2 часа меняется энергия электромагнитного поля эндогенного происхождения.

Далее в работе рассматривалась идея о связи энергии электромагнитного поля эндогенного происхождения с вариациями электрического сопротивления геосреды, требующая своего практического подтверждения. Для этого на основе результатов магнитотеллурического мониторинга в пункте Камбарата было проведено сравнение между анизотропными свойствами электрического сопротивления с энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения (рис. 8). Как показано на рис. 8, существует устойчивая связь между анизотропией электрического сопротивления и энергетической характеристикой электро-

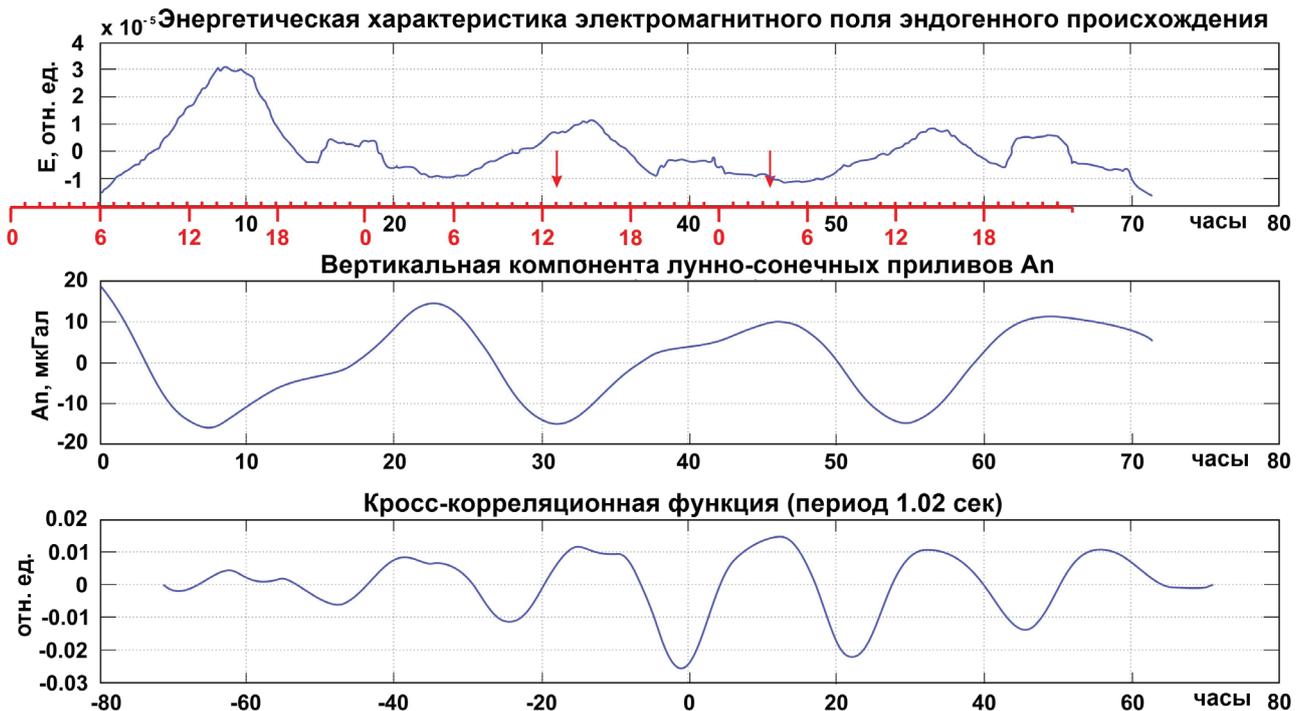


Рис. 3. Энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения для стационарного пункта МТЗ Ак-Суу (рис. 1) в сопоставлении с лунно-солнечными приливными воздействиями (стрелками обозначены сейсмические события).

Fig. 3. Energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin for the MT stationary point Ak-Suu (Fig. 1) in comparison with the lunar-solar tidal effects (arrows indicate seismic events).

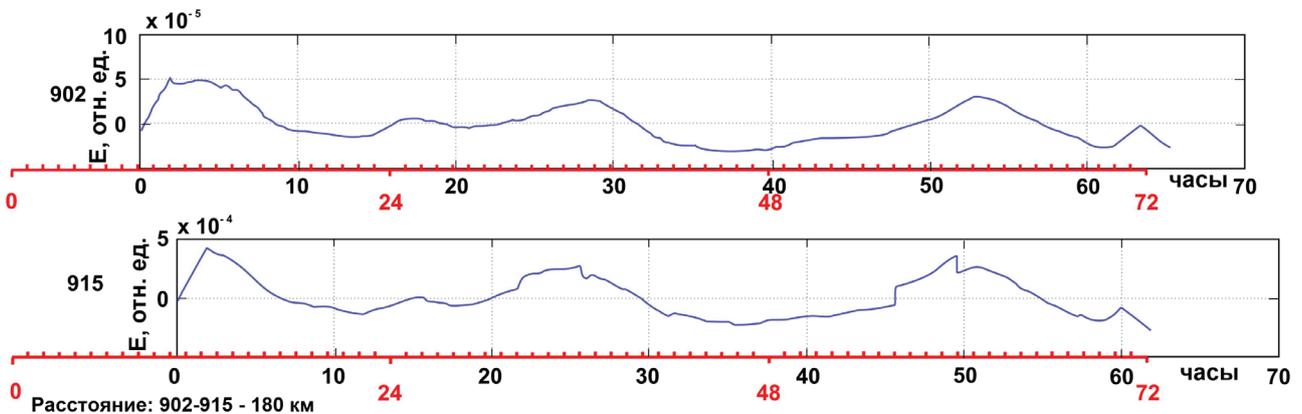


Рис. 4. Энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения для пунктов ГМТЗ 902 и 915 (рис. 1).

Fig. 4. Energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin for the DMT points 902 and 915 (Fig. 1).

магнитного поля эндогенного происхождения. При сопоставлении полученных параметров с распределением сейсмичности в пункте Камбарата, обращает на себя внимание факт приуроченности сейсмических событий к участкам с высокими градиентами вариаций кажущегося сопротивления (ρ_k) и участкам спада энергетической характеристики.

Для пунктов ГМТЗ 900 и 902 было выполнено сопоставление результатов обработки полевых наблюдений (рис. 9, 10). Сейсмические события (Каталог ..., 2014), произошедшие во время регистрации магнитотеллурического поля, находятся

на расстоянии ≥ 120 км от пункта зондирования 900 (азимуты местоположения землетрясений $\sim 40^\circ$ и 15°) и на расстоянии ≥ 150 км для пункта ГМТЗ 902 (азимуты местоположения землетрясений $\sim 50^\circ$ и 10°)¹. В регистрируемых временных рядах вариаций кажущегося сопротивления также удается выделить характерные признаки

¹ Отчет о научно-исследовательской работе: «Изучение геодинамических, сейсмических и геофизических процессов как основы прогноза землетрясений (включая моделирование неупругих процессов в сейсмогенерирующих зонах». Научное направление 78. Бишкек: Фонды НС РАН, 2011. 93 с.

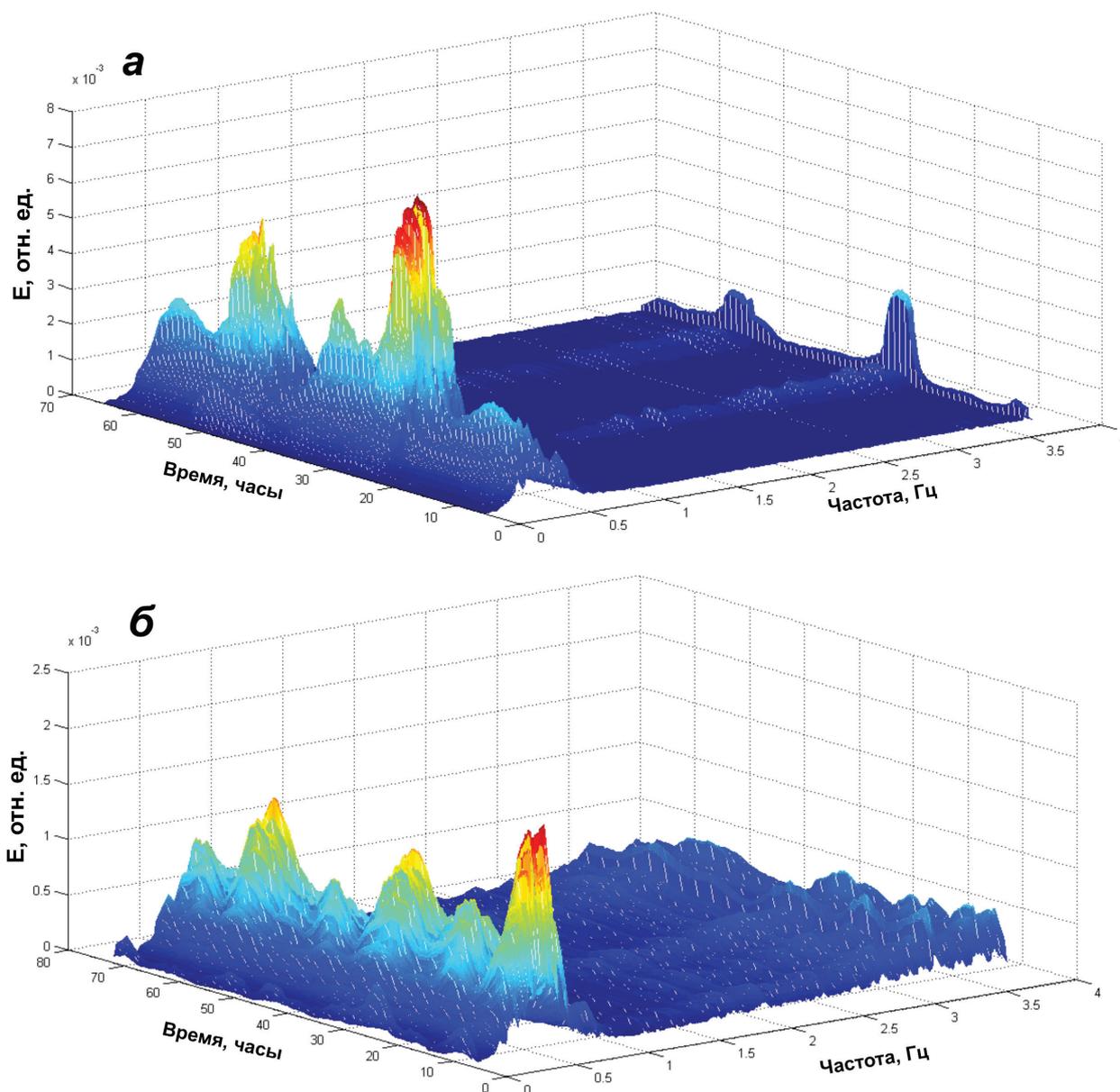


Рис. 5. Расчет энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения в трехмерном формате для пунктов ГМТЗ 901 (а) и 902 (б).

Fig. 5. The calculation of the energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin in a three-dimensional format for the DMT points 901 (a) and 902 (b).

изменений кажущегося сопротивления среды, обусловленных сейсмическими событиями.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выявлены некоторые закономерности в поведении рассматриваемых параметров:

- существует устойчивая связь между анизотропией электрического сопротивления и энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения;
- присутствует задержка по времени между лунно-солнечными приливами и изменением энергии электромагнитного поля эндогенного

происхождения, для пункта МТЗ 901 (частоты больше 0.2 Гц) это время задержки составляет 2.2 часа;

- современные геодинамические процессы приводят к изменению структурно-текстурных характеристик горной породы, выражающиеся в как обратимых процессах (закрытие и раскрытие трещин), так и в необратимых процессах, связанных с процессами трещинообразования;
 - единый геодинамический процесс проявляется в двух взаимосвязанных явлениях;
 - изменении сопротивления горной породы и генерации источников электромагнитного поля.
- Эти закономерности подтверждают и существенно дополняют исходную рабочую гипотезу.

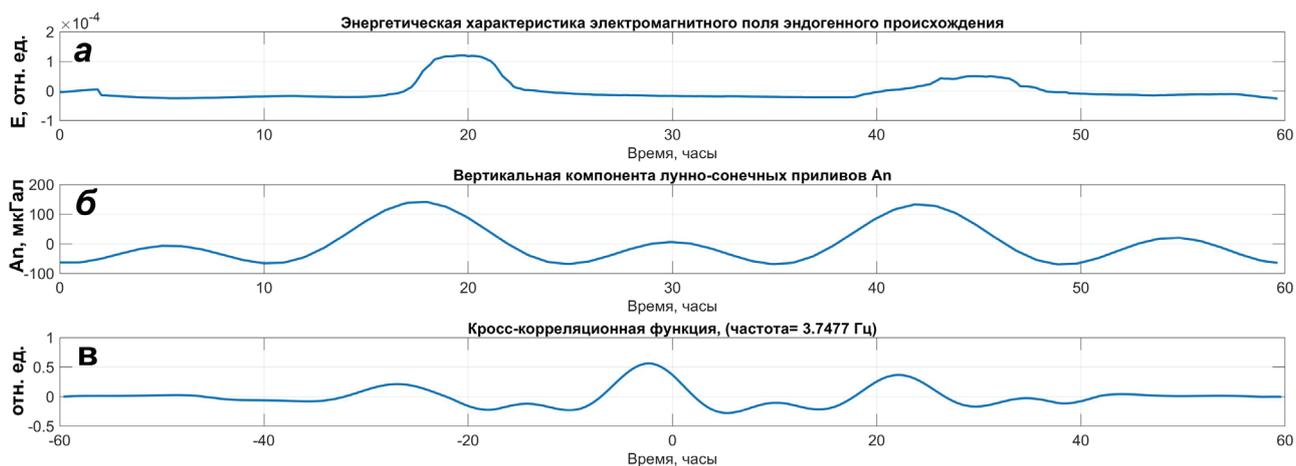


Рис. 6. Результаты сопоставления энергетической характеристики электромагнитного поля (*a*) и лунно-солнечных приливов (*b*) на частоте 3.7477 Гц для пункта МТЗ 901. Функция взаимной корреляции кривых *a* и *b* (*v*).

Fig. 6. The results of the comparison of the energy characteristics of the electromagnetic field (*a*) and lunar-solar tides (*b*) at a frequency of 3.7477 Hz for the DMT point 901. Below is the function of the cross-correlation of the *a* and *b* curves (*v*).

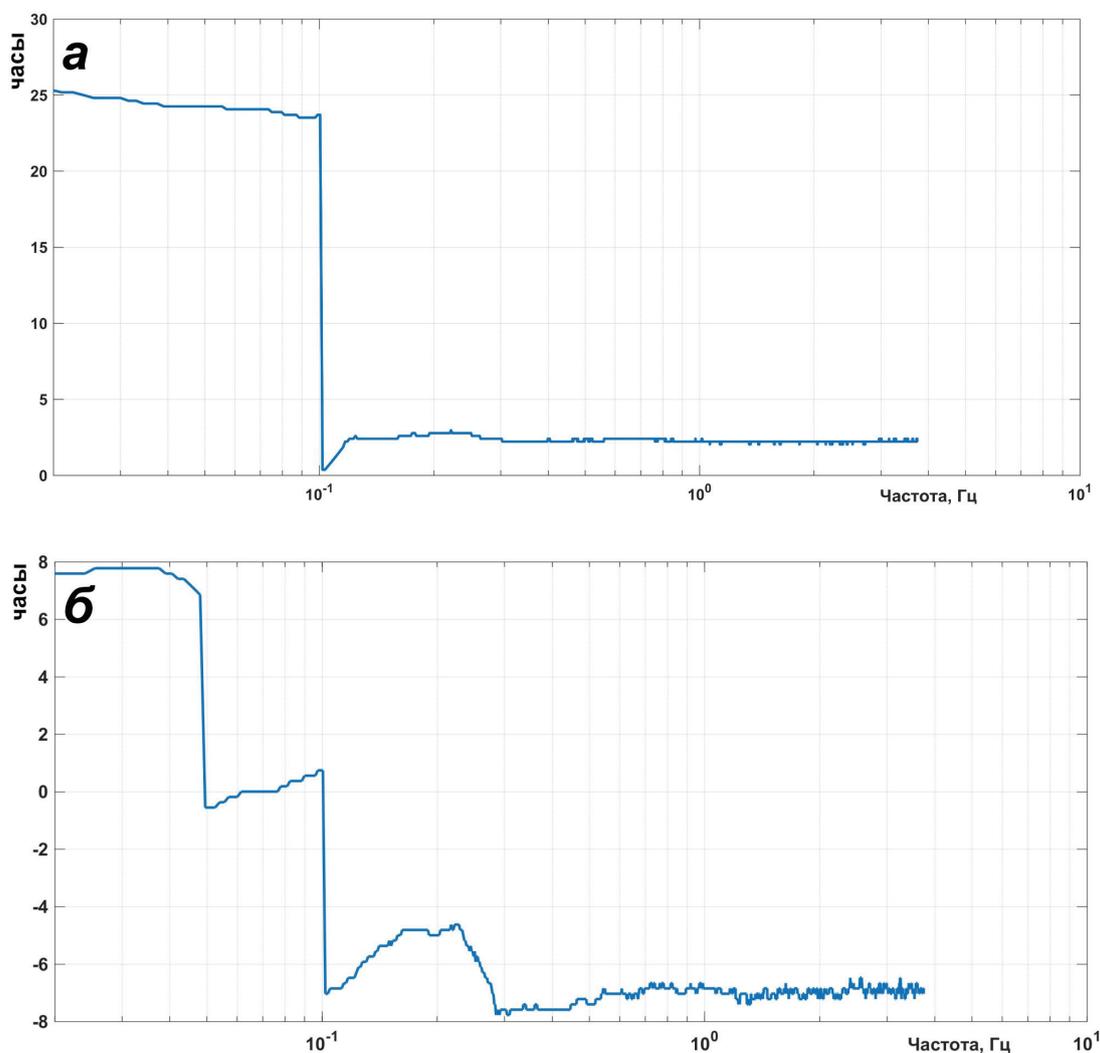


Рис. 7. Время задержки, вычисленное по всем частотам для пунктов ГМТЗ 901 (*a*) и 902 (*b*). Местоположение пунктов ГМТЗ представлено на рис. 1.

Fig. 7. Delay time calculated over all frequencies for GMT points 901 (*a*) and 902 (*b*). Location of the DMT points is shown on Fig.1

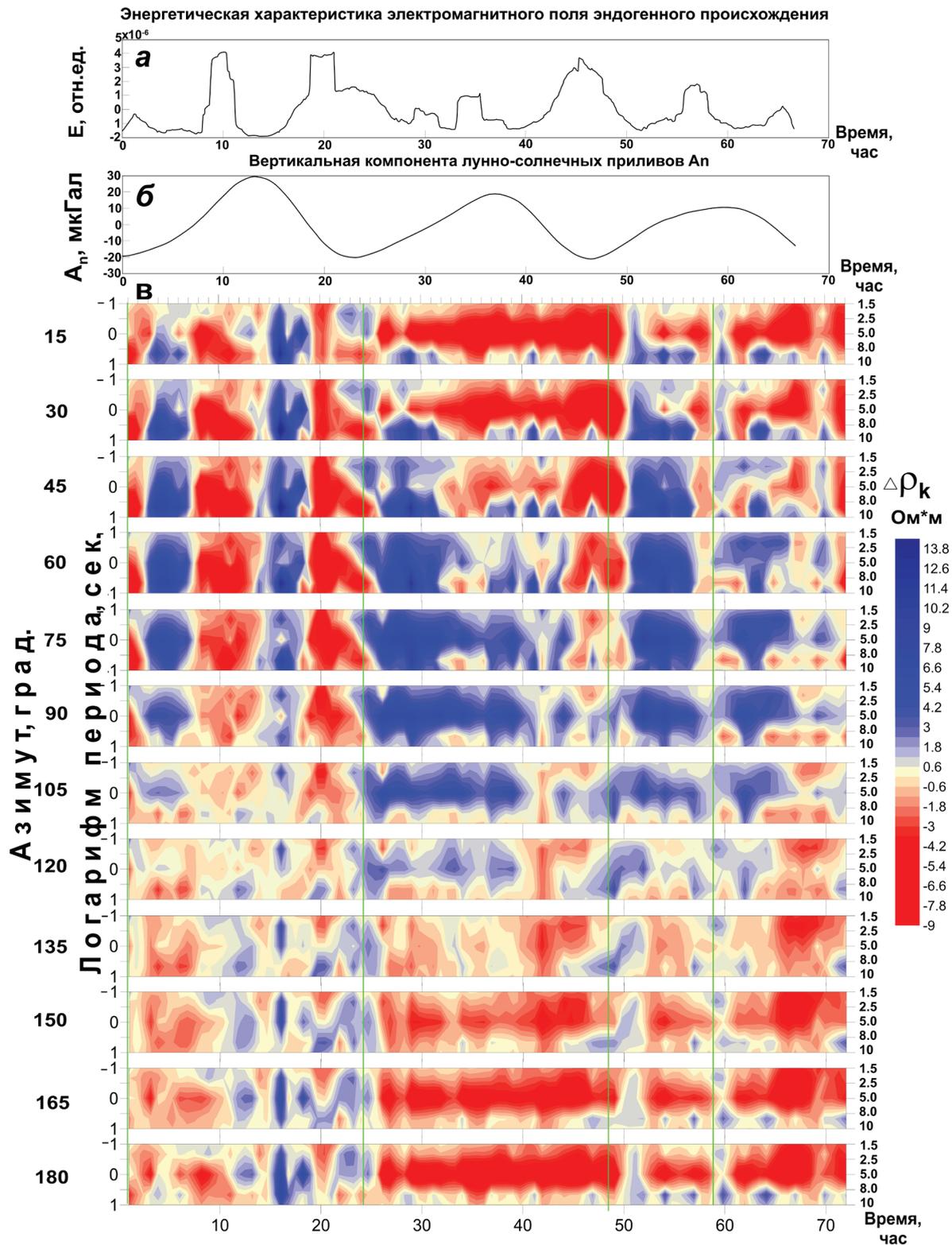


Рис. 8. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт Камбарата (рис. 1)) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения. Линии: *a* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *б* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *в* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Местоположение пункта ГМТЗ представлено на рис. 1.

Fig. 8. Comparison between the variation of the anisotropic properties of electrical resistivity (Kambarata point) and the variation of the energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin. Lines: *a* — curve is the energy characteristic of the electromagnetic field of endogenous origin; *б* — the vertical component of the lunar-solar tides A_n ; *в* — apparent resistivity in different azimuths. Location of the DMT point is shown on Fig.1

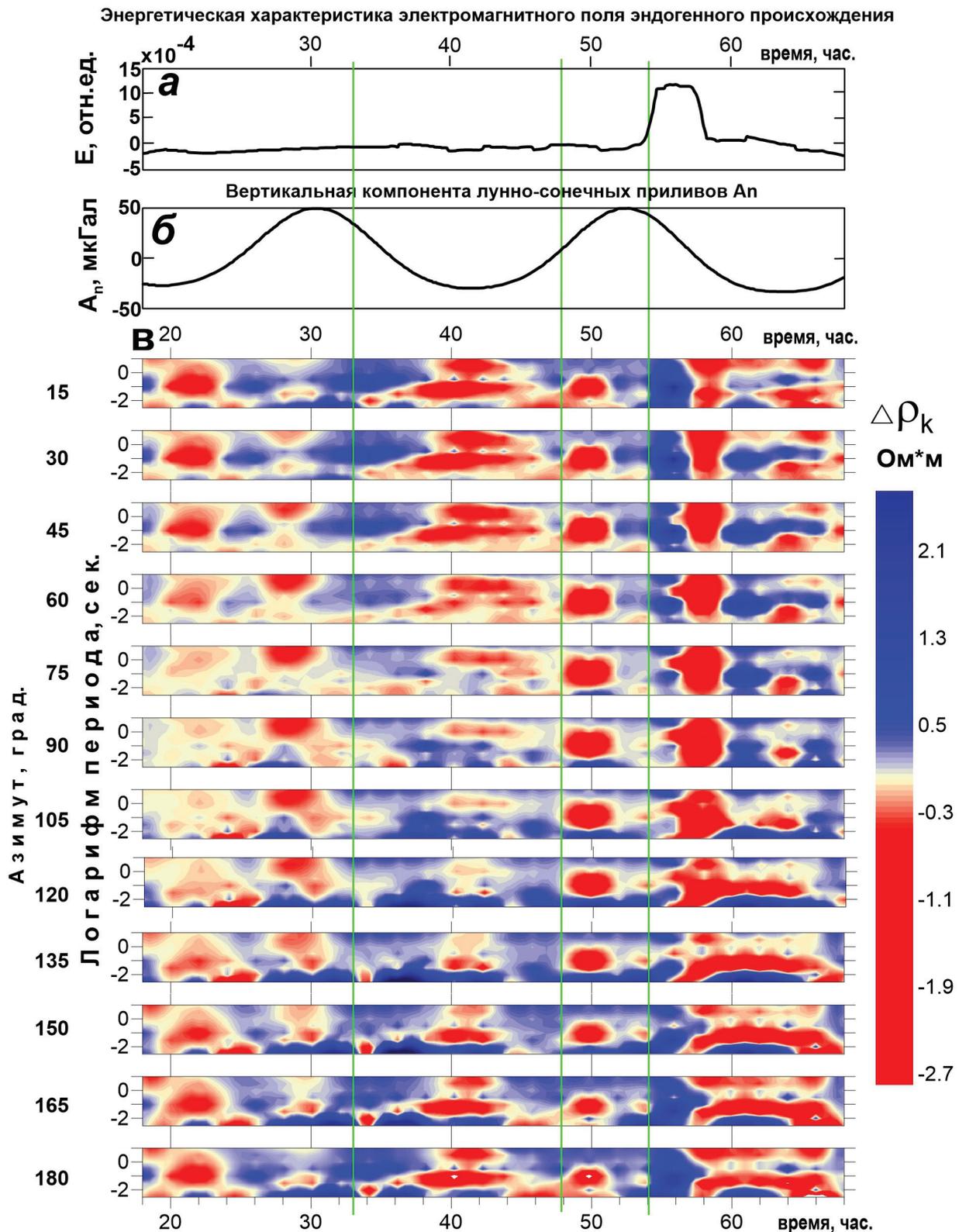


Рис. 9. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт 900) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения. Линии: *a* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *б* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *в* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Местоположение пункта ГМТЗ представлено на рис. 1.

Fig. 9. Comparison between the variation of the anisotropic properties of electrical resistivity (point 900) and the variation of the energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin. Lines: *a* — curve is the energy characteristic of the electromagnetic field of endogenous origin; *б* — the vertical component of the lunar-solar tides A_n ; *в* — apparent resistivity in different azimuths. Location of the DMT point is shown on Fig.1.

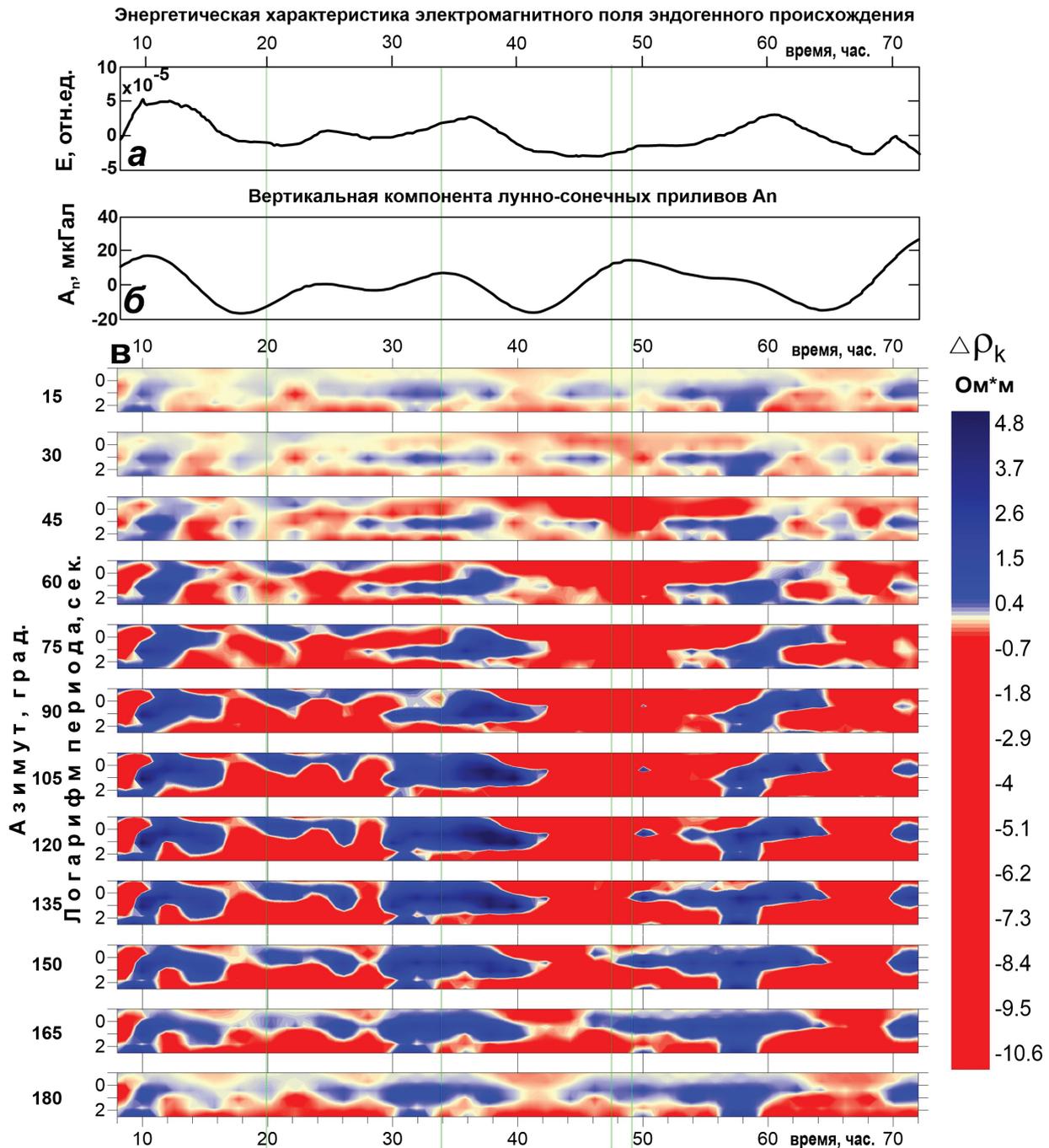


Рис. 10. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт 902) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля. Линии: *a* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *b* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *в* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Местоположение пункта ГМТЗ представлено на рис. 1.

Fig. 10. Comparison between the variation of the anisotropic properties of electrical resistivity (point 902) and the variation of the energy characteristics of the electromagnetic field of endogenous origin. Lines: *a* — curve is the energy characteristic of the electromagnetic field of endogenous origin; *b* — the vertical component of the lunar-solar tides A_n ; *в* — apparent resistivity in different azimuths. Location of the DMT point is shown on Fig.1.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований Научной станции РАН, способствовавших реализации исследований и полевых работ. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №17-05-00844, №17-05-00654).

Список литературы [References]

Александров П.Н., Рыбин А.К. Разделение магнитотеллурического поля на эндогенную и экзогенную составляющие: методологический аспект // Проблемы геодинамики и геоэкологии

внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. VII Международного симпозиума, г. Бишкек, 19–24 июня 2017 г. Бишкек: НС РАН, 2017. С. 384–386 [Aleksandrov P.N., Rybin A.K. Razdeleniye magnitotelluricheskogo polya na endogennuyu i ekzogennuyu sostavlyayushchiye: metodologicheskiiy aspekt // Abstracts of the VII International Symposium «Problems of Geodynamics and Geocology of intracontinental Orogens» (June 19–24, 2017, Bishkek). Bishkek: RS RAS, 2017. P. 384–386 (in Russian)].

Александров П.Н. Теоретические основы обработки данных МТЗ с целью изучения источников электромагнитного поля эндогенного происхождения // Тезисы докладов Шестого международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (23–29 июня 2014 г., г. Бишкек). Бишкек: НС РАН, 2014. С. 157–160 [Aleksandrov P.N. Teoreticheskiye osnovy obrabotki dannykh MTZ s tsel'yu izucheniya istochnikov elektromagnitnogo polya endogennogo proiskhozhdeniya // Abstracts of the Sixth International Symposium «Problems of Geodynamics and Geocology of intracontinental Orogens» (June 23–29, 2014, Bishkek). Bishkek: RS RAS, 2014. P. 157–160 (in Russian)].

Александров П.Н. К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 49–58 [Aleksandrov P.N. To the theory of seismic and electromagnetic monitoring of modern geodynamic processes // Vestnik KRAUNTs. Earth Sciences. 2009. № 2(14). P. 49–58 (in Russian)].

Александров П.Н. Движущийся контролируемый источник электромагнитного поля в проводящей среде // Теория и практика интерпретации данных электромагнитных и геофизических полей, 16–19 сентября 1996 г., г. Екатеринбург. Тез. докл. Екатеринбург, 1996. С. 50 [Aleksandrov P.N. Dvizhushchiysya kontroliruyemyy istochnik elektromagnitnogo polya v provodyashchey srede // Theory and practice of interpretation of electromagnetic and geophysical fields data, September 16–19, 1996. Ekaterinburg. Abstracts Ekaterinburg, 1996. P. 50 (in Russian)].

А. с. №123979 U1. Неполаризующийся электрод для наземной геофизической электроразведки. Патент на полезную модель RU / Лосихин Л.Н., Матюков Е.К., Пазников В.А. и др.; заявитель и патентообладатель Научная станция РАН, опубликовано 10.01.2013 г. [RU 123979 U1 Non-polarizable electrode for ground geophysical electrical prospecting. Patent for utility model / Losikhin L.N., Matyukov E.K., Paznikov V.A. et al.; applicant and patent holder Scientific station of the Russian Academy of Sciences, published 10.01.2013 (in Russian)].

Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К. и др. Теоретические обоснования исследований дефор-

мационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения // Математическое моделирование процессов и систем: Коллективная монография по материалам пленарных докладов VIII Международной молодежной научно-практической конференции, 4–7 октября 2018 г., г. Уфа. Ч. I / Отв. ред. С.А. Мустафина. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2018. С. 95–122 [Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Rybin A.K. et al. Teoreticheskiye obosnovaniya issledovaniy deformatsionnykh protsessov v litosfere Zemli na osnove seysmicheskikh i elektromagnitnykh poley endogennogo proiskhozhdeniya // Mathematical Modeling of Processes and Systems: A Collective Monograph on the Materials of Plenary Reports of the VIII International Youth Scientific and Practical Conference, October 4–7, 2018 Ufa. Pt. I / Ed. S.A. Mustafina-Sterlitamak: Sterlitamak branch of Bashkir State University, 2018. P. 5–122 (in Russian)].

Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К. и др. Разделение магнитотеллурического поля на экзогенную и эндогенную составляющую. Первые практические результаты // Сборник материалов IV Школы-семинара «Гординские чтения»: Президиум РАН / Отв. Ред. А.А. Макарова. М.: ИФЗ РАН, 2017. С. 25–29 [Batalev V.Yu., Bataleva E.A., Rybin A.K. et al. Razdeleniye magnitotelluricheskogo polya na ekzogennuyu i endogennuyu sostavlyayushchuyu. Pervyye prakticheskiye rezul'taty // Proceedings of the IV School-Seminar «Gordinskie chteniya»: Presidium of the Russian Academy of Sciences / Resp. Ed. A.A. Makarova. M.: IFZ RAS, 2017. P. 25–29 (in Russian)].

Баталева Е.А., Мухаммадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356> // Geodynamics & Tectonophysics. 2018. № 2. С. 461–487 [Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic test area). Geodynamics & Tectonophysics. 2018. V. 9. № 2. P. 461–487 (in Russian)].

Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Развитие методики анализа данных магнитотеллурического мониторинга // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов Материалы докладов Шестого международного симпозиума к 35-летию Научной станции РАН и 15-летию Международного научно-исследовательского центра — геодинамического полигона Бишкек: НС РАН, 2015. С. 148–154 [Bataleva E.A., Batalev V.Yu. Razvitiye metodiki analiza dannykh magnitotelluricheskogo monitoringa // Problems of geodynamics and geocology of intracontinental orogens Proceedings of the Sixth International

- Symposium on the 35th anniversary of the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences and the 15th anniversary of the International Research Center — Geodynamic Polygon Bishkek: RS RAS, 2015. P. 148–154 (in Russian)].
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Ч. 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга // Вестник КРСУ. 2014а. Т. 14. № 7. С. 3–7 [Bataleva E.A., Batalev V.Yu. Development of programs for analyzing azimuthal magnetotelluric monitoring data Pt. 1. Analysis of magnetotelluric monitoring data // Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta. 2014a. V. 14. № 7. P. 3–7 (in Russian)].
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Ч. 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ мониторинга // Вестник КРСУ. 2014б. Т. 14. № 7. С. 8–12 [Bataleva E.A., Batalev V.Yu. Development of programs for analyzing azimuthal magnetotelluric monitoring data Pt. 2. Development of software for analyzing monitoring data МТ // Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta. 2014b. V. 14. № 7. P. 8–12 (in Russian)].
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К.* К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. 2013. № 3. С.105–113 [Bataleva E.A., Batalev V.Yu., Rybin A.K. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2013. V. 49. Iss. 3. P. 402–410. <https://doi.org/10.1134/S1069351313030038>].
- Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.* Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды // Геофизические исследования. 2014. Т.15. № 4. С. 54–63 [Bataleva E.A., Rybin A.K., Batalev V.Yu. Variations of rocks apparent resistivity as an indicator of stress-deformed state of the medium. Geophysical Research. 2014. V. 15. № 4. P. 54–63 (in Russian)].
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 p. [Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Springer Berlin. 563 p. (in Russian)].
- Гершензон Н.И., Гохберг М.Б.* О происхождении аномальных ультранизкочастотных возмущений геомагнитного поля перед землетрясением в Лома Приета (Калифорния) // Изв. РАН. Физика Земли. 1994. № 2. С. 19–24 [Gershenson N.I., Gokhberg M.B. On the origin of anomalous ultralow-frequency perturbations of the geomagnetic field before an earthquake in Loma Prieta (California) // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 1994. № 2. P. 19–24 (in Russian)].
- Жданов М.С.* Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с. [Zhdanov M.S. Elektrozrazvedka. M.: Nedra, 1986. 316 p. (in Russian)].
- Каталог землетрясений Кыргызстана за 2011–2013 гг. // Приложение к журналу «Вестник Института сейсмологии НАН КР» / Составители: Абдрахматов К.Е., Березина А.В., Молдобекова С.К., Соколова Н.П. 2014. Бишкек, Институт сейсмологии НАН КР. 288 с. [Katalog zemletryasenyiy Kyrgyzstana za 2011–2013 gg. // Prilozheniye k zhurnalu «Vestnik Instituta seysmologii NAN KR» / Sostaviteli: Abdrakhmatov K.Ye., Berezina A.V., Moldobekova S.K., Sokolova N.P. 2014. Bishkek, Institut seysmologii NAN KR. 288 p. (in Russian)].
- Кондратьев О.К.* Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986. 176 с. [Kondratyev O.K. Seismic waves in absorbing media. M.: Nedra, 1986. 176 p. (in Russian)].
- Матюков В.Е., Рыбин А.К., Александров П.Н., Баталева Е.А.* Сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений, г. Бишкек Тезисы докладов Международной Юбилейной научной конференции, посвященной 40-летию со дня образования Научной станции РАН в г. Бишкеке. Бишкек, 2018. С. 67–70 [Matyukov V.E., Rybin A.K., Aleksandrov P.N., Bataleva E.A. Comparison of the energy characteristics of the selected electromagnetic field of endogenous origin with the parameters of lunar-solar tides // The Influence of external fields on the seismic regime and monitoring of their manifestations, Bishkek Abstracts of the International Anniversary Scientific Conference dedicated to the 40th anniversary of the founding of the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. Bishkek, 3–7 July 2018. P. 67–70 (in Russian)].
- Механика разрушения горных пород / Отв. ред. Шемякин Е.И. М.: ИФЗ РАН, 1987. 217 с. [Mechanics of rock destruction / Ed. Shemyakin E.I. M.: IFZ RAS, 1987. 217 p. (in Russian)].
- Разрушение горных пород при бурении скважин / В.В. Симонов, Ю.А. Палашенко, Е.К. Юнин. М.: Недра, 1979. 115 с. [The destruction of rocks during drilling / V.V. Simonov, Yu.A. Palashchenko, E.K. Yunin. M.: Nedra, 1979. 115 p. (in Russian)].
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А. и др.* Разработка распределенной интерактивной системы доступа к результатам магнитотеллурического мониторинга // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: материалы Пятого международного симпозиума, 19–24 июня 2012, Бишкек. Москва-Бишкек. 2012. С.179–187 [Rybin A.K., Batalev V.Yu., Bataleva E.A. et al. Development of a distributed interactive access system to the results

- of magnetotelluric monitoring // Current problems of geodynamics and geocology of intracontinental orogens: proceedings of the Fifth International Symposium, June 19–24, 2012, Bishkek. Moscow-Bishkek. 2012. P.179–187 (in Russian)].
- Светов Б.С.* Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. М.: ИЗМИРАН, 1984. 183 с. [*Svetov B.S.* Electrodynamical foundations of quasi-stationary geoelectrics. M.: IZMIRAN, 1984. 183 p. (in Russian)].
- Светов Б.С.* Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Известия вузов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99–116 [*Svetov B.S.* Electromagnetic monitoring of seismotectonic processes // *Izvestiya universities. Geology and exploration.* 1992. № 2. P. 99–116].
- Сейсмический мониторинг земной коры / Отв. ред. А.В. Николаев. АН СССР, М.: ИФЗ, 1986. 289 с. Seismic monitoring of the earth's crust / Resp. ed. A.V. Nikolaev Academy of Sciences of the USSR, Moscow: IPA, 1986. 289 p. (in Russian)].
- Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И.* Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли. 1997. № 5. С. 36–46 [*Svetov B.S., Karinsky S.D., Kuksa Yu.I., Odintsov V.I.* Magnetotelluric monitoring of geodynamic processes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 1997. № 5. P. 36–46].
- Сейсмический мониторинг земной коры / Отв. ред. А.В. Николаев. АН СССР, М.: ИФЗ, 1986. 289 с. [*Seismicheskiy monitoring zemnoy kory / Otv. red. A.V. Nikolayev. AN SSSR, M.: IFZ, 1986. 289 p. (in Russian)]*].
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с. [*Sobolev G.A.* Basics of earthquake prediction. M.: Science, 1993. 313 p. (in Russian)].
- Хмелевской В.К.* Электроразведка. М.: Изд-во МГУ. 1984. 422 с. [*Khmelevskoy V.K.* Elektrorazvedka. M.: Izd-vo MGU. 1984. 422 p. (in Russian)].
- Шамина О.Г., Понятовская В.И.* Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред. М.: ИФЗ РАН, 1993. 179 с. [*Shamina O.G., Ponyatovskaya V.I.* Model studies of heterogeneous and fractured media. M.: IFZ RAS, 1993. 179 p. (in Russian)].
- Alexandrov P.N.* Matimathical model of electromagnetic field emission taking into account motion of the source // *Journal of earthquake prediction research.* 1997. V. 6. № 4. P. 560–571.
- Earthquake remote sensing frontierresearch seismoelectromagnetic phenomena in the lithosphere, atmosphere and ionosphere // Final report. March. 2001. Tokyo, Japan. 229 p.
- Lahr J.C.* Hypoellipse. A computer program for determining local earthquakes hypocentral parameters magnitude, and first-motion pattern: U.S. Geological Survey Open-File Report 99–23. Version 1.1. 119 p.

STUDY OF IRREVERSIBLE DEFORMATIONS IN THE TIEN SHAN LITHOSPHERE BASED ON MAGNETOTELLURIC DATA (METHODOLOGICAL ASPECT)

V.Yu. Batalev, E.A. Bataleva, V.E. Matyukov, A.K. Rybin

Federal State Budget Institution of Science Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek city, 720049, Bishkek, Kyrgyz Republic

Based on the field depth magnetotelluric measurements performed in the Tien Shan region, examples of the extraction of an electromagnetic field of endogenous origin are considered. The research was based on the following working hypothesis: irreversible rock deformations (cracking (and)) caused by the development of modern geodynamic processes form sources of the electromagnetic field of endogenous origin. The authors have introduced an approach that suggests the electromagnetic field of endogenous origin to be included in the impedance relations in an additive manner, which allows us to separate the electromagnetic field recorded on the surface, according to the position of the sources. The main point of this algorithm is that the known impedance of the lower half-space requires finding the difference between the tangential components of the electromagnetic field registered on the day surface. To implement the algorithm, a data processing programme for magnetotelluric sensing was compiled in order to identify sources of electromagnetic fields of endogenous origin.

Keywords: magnetotelluric sounding, lunar-solar tides, energy characteristic, Tien Shan.